第45卷 第6期
2022年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 45 No. 6
Nov. 2022

近61 a黄河流域霜冻日期时空分异特征及影响因素

张志高[1]， 徐晓曼[2]， 郭超凡[1]， 蔡茂堂[3]， 袁 征[4]， 张明哲[1]

（1. 安阳师范学院资源环境与旅游学院，河南 安阳 455000；2. 河南大学黄河文明与可持续发展研究中心，河南 开封 475001；3. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；4. 安阳工学院材料科学与工程学院，河南 安阳 455000）

摘 要：深入研究黄河流域霜冻演变规律，可为科学防范霜冻危害，促进气候资源合理开发利用提供依据。基于1960—2020年黄河流域83个气象站点统计资料，采用Mann-Kendall突变检验、Morlet小波分析和相关分析等方法，对黄河流域霜冻日期时空变化特征及其影响因素进行了分析。结果表明：（1）1960—2020年黄河流域平均初霜日期为10月8日，终霜日期为4月30日，平均无霜期161 d。61 a来初霜日以2.51 d·(10a)$^{-1}$的速率推迟、终霜日以−2.07 d·(10a)$^{-1}$的速率提前，无霜期以4.48 d·(10a)$^{-1}$的速率显著延长。20世纪70年代初霜日最早，终霜日最晚，无霜期最短，21世纪10年代初霜日最晚，终霜日最早，无霜期最长。（2）小波分析表明，黄河流域初、终霜日和无霜期均存在28 a左右的主周期变化。初霜日于2002年发生突变，终霜日于2000年突变，无霜期突变发生于2001年。（3）从空间分布来看，由上游、中游到下游地区初霜日逐渐延迟，终霜日逐渐提前，无霜期日数逐渐延长。初霜日在流域各地均呈推迟趋势，终霜日仅在西南部合作、久治站呈推迟趋势，无霜期在各地均呈延长趋势，下游地区初霜日和无霜期变化幅度最大。（4）黄河流域初、终霜日和无霜期主要受海拔高度和日平均气温的影响。

关 键 词：初霜日；终霜日；无霜期；时空分异；黄河流域

文章编号：1000－6060(2022)06－1685－10(1685～1694)

近100多年来，地球气候正在经历以全球变暖为主要特征的变化，IPCC第六次评估报告指出，全球地表温度正以前所未有的速度上升，2011—2020年全球平均表面温度相比1850—1900年上升1.09 ℃[1]。全球变暖将改变气温、辐射以及降水等要素的地理分布，导致高温、洪涝等灾害频繁，严重危害农业生产、自然生态以及人类生活环境[2-3]。霜冻是由于寒潮和强冷空气活动引致土壤或植物表面温度降至0 ℃以下而造成作物受害的现象[4]。在全球气候变暖背景下，初、终霜日及霜期的变化会显著影响农业作物生产及粮食安全[5-7]。因此，霜冻的时空演变特征及其影响因素与灾害评估受到了国内外学者的广泛关注[8-12]。相关研究表明，欧洲[13]和北美[14]等地初霜日推迟，终霜日提前，霜冻日数呈减少趋势。近50 a来，中国大部分地区如吉林省[15]、淮河流域[16]、黄土高原[17]和甘肃省[18]等地霜期缩短，初霜日推迟而终霜日提前，但是霜冻时空变化特征具有明显的区域差异[19]。在霜冻变化影响因素方面，王国复等[20]认为中国大部地区霜期缩短，初霜日推迟，终霜日提前主要与日最低气温和0 cm最低地温的不断升高有关；马彬等[21]认为极涡与副热带高压的位置、强度、面积变化驱动了中国农业区霜冻多年气候状态的转变；陈少勇等[22]探讨了西北地区影响初霜冻发生的环流特征，认为与副热带高压正相关，与极涡负相关，初霜日推迟是气候变暖的结果；吴杨等[23]建立了浙江省春霜冻日

收稿日期：2022-03-30； **修订日期**：2022-04-22

基金项目：国家自然科学基金项目（41602366）；河南省高等学校青年骨干教师项目（2020GGJS188）；河南省科技攻关项目（222102320364）；河南省高等学校重点科研项目（21A170002，21A170004）资助

作者简介：张志高（1986-），男，博士，副教授，主要从事气候变化研究. E-mail: Zhangzhg06@163.com

通讯作者：蔡茂堂（1981-），男，博士，副研究员，主要从事气候变化研究. E-mail: Caimaotang@126.com

与太平洋海温的遥相关关系；贾艳青等[24]研究发现城市化进程导致长三角地区霜冻日数明显减少。还有学者分析了霜冻灾害对大豆[25]、茶树[26]和冬小麦[27]等作物的影响。

黄河流域横跨我国北方东、中、西三大地理阶梯，流域上、中、下游地形地貌、植被及气候类型分异显著，为我国重要的生态安全屏障。黄河流域现有耕地 1.3×10^7 hm^2，粮食产量约占全国1/3，在我国农业生产中占有重要地位。然而流域内气候温差较大且季节差异明显，降水集中但分布不均匀，旱涝及霜冻等气象灾害严重影响流域内农业生产。因此，本文基于1960—2020年逐日气象观测数据，运用趋势分析、Mann-Kendall突变检验、相关分析及R/S分析等方法对黄河流域初霜、终霜日及无霜期的时空演变进行研究，并探讨其与地理因子的关系，以期为流域霜冻灾害的预警和防范以及指导农业生产提供科学依据和参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄河流域(32°~42°N，96°~119°E)横贯我国中北部，包含青海、四川等9省区，流域面积约 7.5×10^5 km^2。黄河流域海拔在0~6241 m，西接青藏高原，多为山地，中部以黄土高原区为主，水土流失严重，东邻华北平原，地势西高东低。流域地处中纬度地带，受大气环流和季风环流影响较为复杂，西部为大陆性干旱气候，中部为季风性半干旱气候，东部属海洋性半湿润气候。流域多数地区降水量在200~650 mm，且年内分布不均，多集中在6—10月，年均气温在-4~14 ℃，全年日照时数在2000~3300 h。为研究黄河流域霜冻变化的区域特征，将黄河流域进一步划分为上、中、下游地区，其中，上游地区包括久治、景泰、包头等33个气象站点，中游地区包括武功、靖边、神木等43个气象站点，下游地区包括新乡、郑州、沂源等7个气象站点(图1)。

1.2 数据来源

黄河流域83个气象站点1960—2020年逐日地面温度数据来源于中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.cn)中国地面气候资料日值数据集，该数据集经过极值检验和RHtest均一性检验等方面的严格质量控制。以地面最低温度≤0 ℃作为霜冻指标，参考前人研究[28]，中国北方初霜日一般在8月1日后，因此以8月1日作为统计起始点，将8月1日定义为1，用日序表示初、终霜日，初霜日为8月1日以后第一次出现地面最低温度≤0 ℃的日期，终霜日为最后一次地面最低温度≤0 ℃的日期，霜冻终日的翌日至初日的前一天之间的日数为无霜期。利用算术平均法建立1960—2020年黄河流域初霜期、终霜期和无霜期序列。

1.3 研究方法

采用线性倾向估计法分析黄河流域霜冻的时间变化特征；采用Mann-Kendall检验法对黄河流域霜冻日期进行突变分析[29]；采用Morlet小波分析方法对黄河流域霜冻周期变化特征进行分析；利用Pearson相关分析法和线性回归法分析霜冻日期与地理因子(经纬度和海拔高度)和日平均气温的关系，变量间相关性强度依据相关系数(r)绝对值大小分为5个等级，分别为极强相关($0.8<|r|\le1.0$)、强相

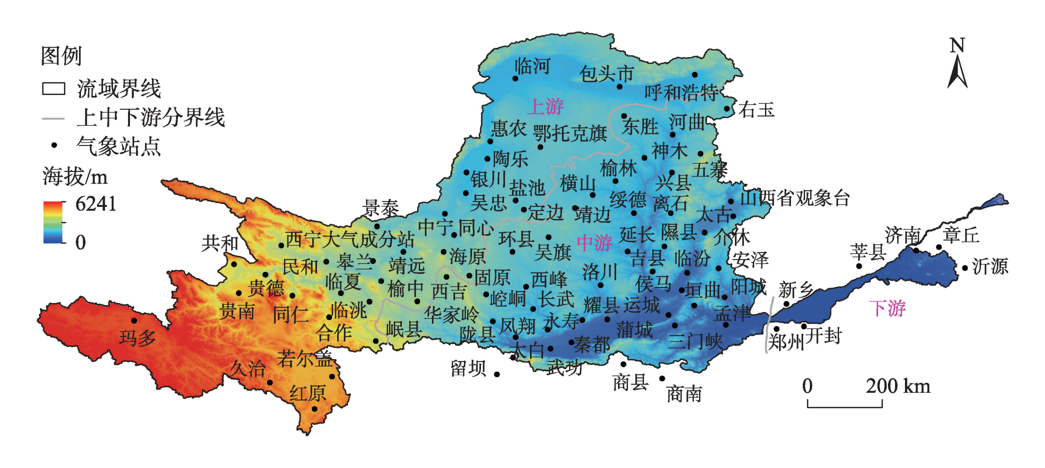


图1 黄河流域气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorology stations in the Yellow River Basin

关（0.6<|r|≤0.8）、中等程度相关（0.4<|r|≤0.6）、弱相关（0.2<|r|≤0.4）和极弱相关（0.0<|r|≤0.2）；基于ArcGIS 10.0软件，采用克里金插值和自然断点法分析霜冻日期空间分布特征。

2 结果与分析

2.1 黄河流域霜冻日期时间变化特征

1960—2020年黄河流域初霜日、终霜日和无霜期时间变化（图2、表1）。近61 a来黄河流域初霜平均日期为10月8日，其中1972年初霜日最早，为9月22日，2016年初霜日最晚，为10月22日，线性拟合可知，黄河流域初霜日期显著推迟，倾向率为2.51 d·(10a)$^{-1}$（图2a）。1960—2020年黄河流域终霜平均日期为4月30日，其中，2008、2011、2013、2015年和2017年终霜日最早，为4月21日，1974年终霜日最晚，为5月12日，61 a来终霜日以−2.07 d·(10a)$^{-1}$的倾向率显著提前（图2b）。1960—2020年黄河流域无霜期平均为161 d，其中1974年最短，为140 d，2016年最长，为182 d，61 a来无霜期显著延长，倾向率为4.48 d·(10a)$^{-1}$（图2c）。

年代际变化方面，20世纪70年代初霜日最早，平均日期为10月4日，21世纪以来距平转为正值，21世纪10年代初霜日最晚，平均为10月17日。20世纪70年代终霜日最晚，为5月6日，之后逐年代提前，21世纪10年代提前至4月23日。20世纪70年代无霜期最短为150 d，21世纪以来显著延长，21世纪10年代无霜期达176 d，相比70年代延长26 d（表1）。

2.2 上、中、下游地区霜冻日期时间变化特征

1960—2020年黄河流域上、中、下游地区初霜

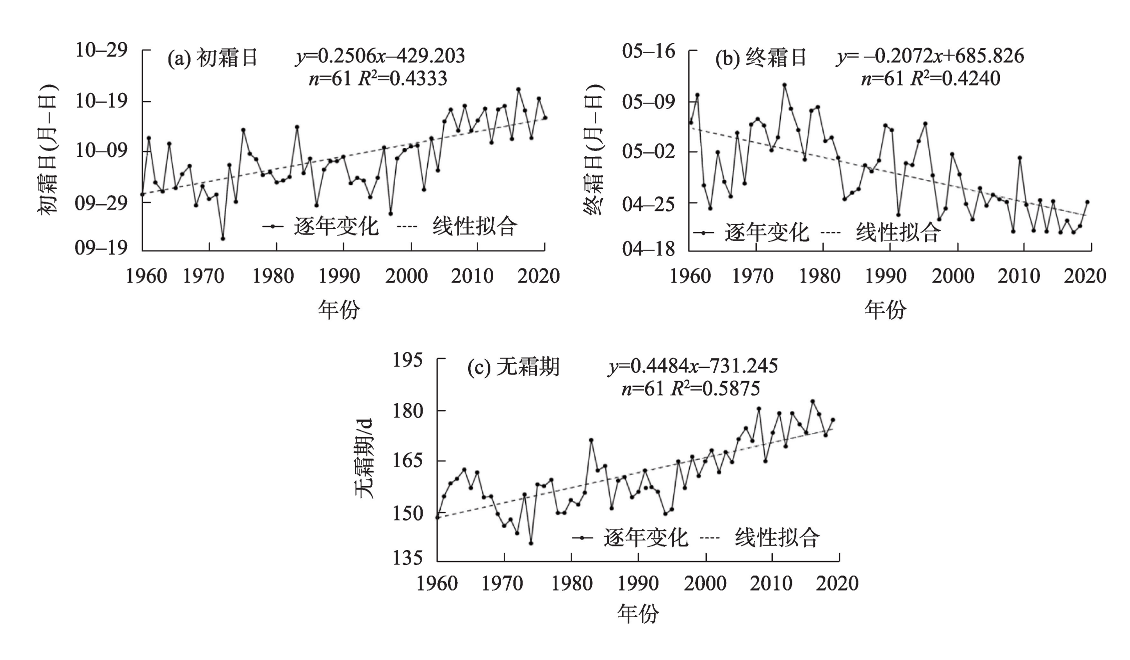


图2 1960—2020年黄河流域初霜日、终霜日和无霜期年际变化

Fig. 2 Annual variations of the first, last frost dates and the frost-free period in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

表1 黄河流域初霜日、终霜日和无霜期年代际变化

Tab. 1 Inter-decadal variations of the first, last frost dates and the frost-free period in the Yellow River Basin

年代	初霜日		终霜日		无霜期/d	
	平均初霜日(月−日)	距平	平均终霜日(月−日)	距平	均值	距平
1960—1969	10−05	−3	05−01	1	155	−6
1970—1979	10−04	−4	05−06	6	150	−11
1980—1989	10−06	−2	05−01	1	158	−3
1990—1999	10−05	−3	04−30	0	157	−4
2000—2009	10−13	5	04−26	−4	169	8
2010—2020	10−17	9	04−23	−7	176	15

日、终霜日和无霜期差异明显(表2)。近61 a来,黄河流域上、中、下游地区初霜日分别为9月24日、10月16日和10月31日,上游地区初霜日最早,下游地区出现最晚,相差37 d;下游地区终霜日为4月6日,上游地区为5月13日,相差37 d;无霜期在下游地区最长为207 d,上游地区最短为132 d,相差75 d。从变化趋势来看,近61 a来黄河流域上、中、下游地区初霜日均呈推迟趋势,终霜日均呈提前趋势,无霜期均显著延长,下游地区初霜日和无霜期变化幅度最大。

2.3 霜冻日期空间分布特征

2.3.1 霜冻日期的平均空间分布特征 黄河流域初霜日、终霜日和无霜期的空间变化(图3)。黄河流域各地初霜日出现在8月4日至11月8日之间,整体呈由南到北递减、由东向西递减趋势,西南部玛多、久治、若尔盖等站初霜日最早,在8月22日之前,东南部商南、郑州、开封、孟津等站初霜日最晚,在11月5日以后(图3a)。近61 a黄河流域各地平均终霜日在3月29日至5月30日之间,总体呈自南向北逐渐推迟、由东向西逐渐推迟趋势,东南部武功、郑州、商南、开封等站终霜日期在4月1日前,西南部玛多、若尔盖、久治、红原等站终霜日期出现最晚,在5月27日以后(图3b)。近61 a黄河流域各地平均无霜期在65~220 d之间,总体呈自南向北减少、由东向西递减趋势,东南部武功、商南、郑州、开封等站无霜期在218 d以上,西南部玛多、久治、若尔盖等站无霜期最短,在85 d以下(图3c)。

2.3.2 霜冻日期变化趋势空间分布特征 1960—2020年黄河流域初霜日、终霜日和无霜期倾向率空间分布(图4)。黄河流域83个站点初霜日倾向率均为正值,气候倾向率在0.05~9.98 d·$(10a)^{-1}$之间,各地初霜日均呈推迟趋势,玛多站推迟幅度最小,共和站推迟幅度最大(图4a)。近61 a黄河流域终霜日倾向率在−4.75~1.05 d·$(10a)^{-1}$之间,其中81个站点倾向率为负值,终霜日呈提前趋势,西南部合作、久治站倾向率为正,终霜日呈推迟趋势(图4b)。近61 a黄河流域无霜期显著延长,气候倾向率在0.12~9.28 d·$(10a)^{-1}$之间,中东部地区无霜期延长幅度较大,西南部地区延长幅度较小,中宁站最大,玛多站最小(图4c)。

表2 1960—2020年黄河流域上、中、下游地区初霜日、终霜日和无霜期变化

Tab. 2 Variations of the first, last frost dates and the frost-free period in upper, middle, lower reaches of the Yellow River Basin from 1960 to 2020

地区	初霜日		终霜日		无霜期	
	平均初霜日(月-日)	倾向率/d·$(10a)^{-1}$	平均终霜日(月-日)	倾向率/d·$(10a)^{-1}$	均值/d	倾向率/d·$(10a)^{-1}$
上游地区	09-24	2.64	05-13	-1.63	132	4.22
中游地区	10-16	2.23	04-23	-2.37	175	4.59
下游地区	10-31	2.76	04-06	-2.33	207	5.05

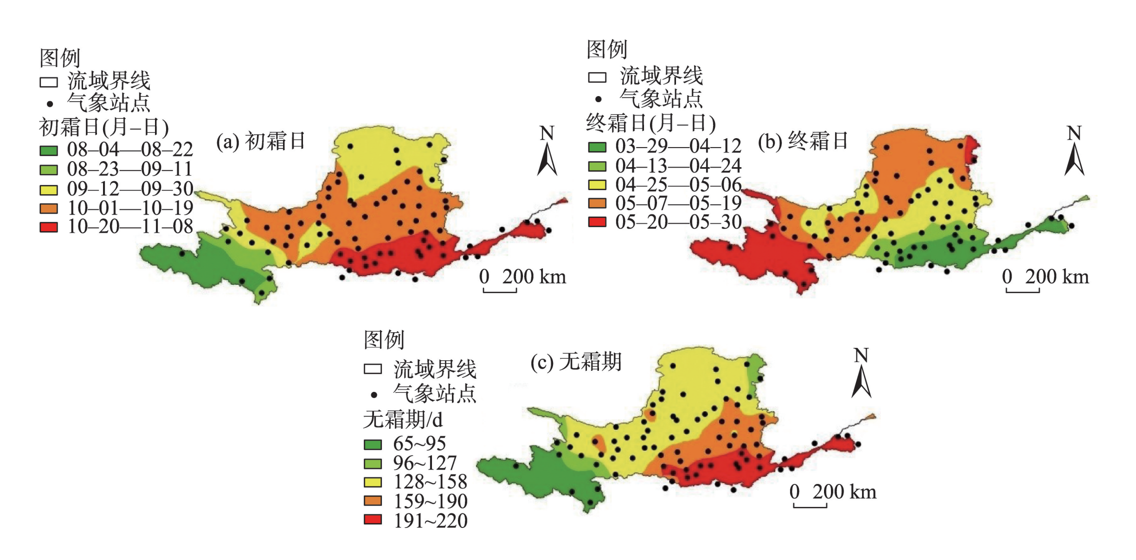


图3 1960—2020年黄河流域初霜日、终霜日和无霜期的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of the first, last frost dates and the frost-free period in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

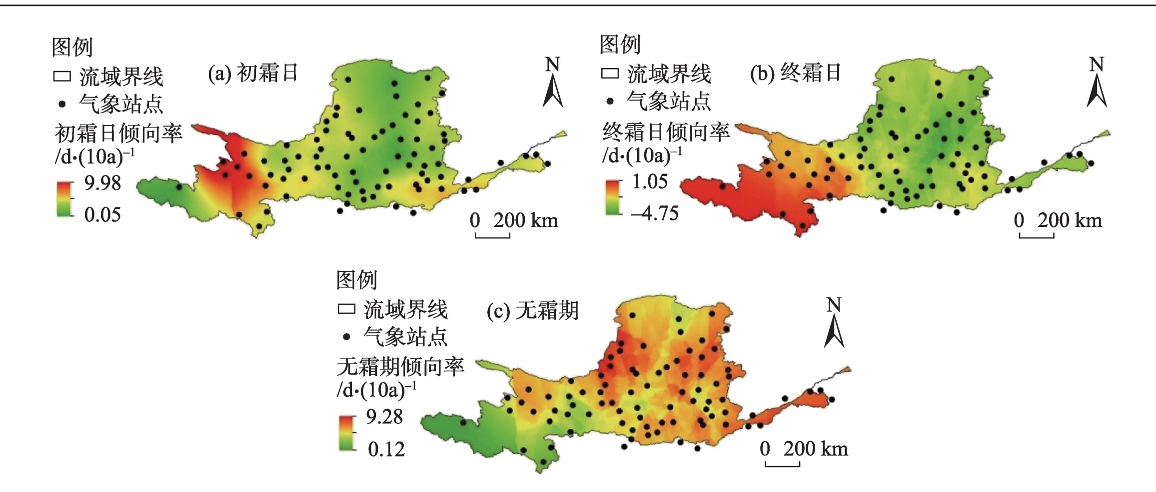


图4 1960—2020年黄河流域初霜日、终霜日和无霜期倾向率的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of the tendency of the first, last frost dates and the frost-free period in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

2.4 霜冻日期突变特征

1960—2020年黄河流域初霜日、终霜日和无霜期M-K突变检验曲线(图5)。近61 a来黄河流域初霜日正序列UF曲线整体呈上升趋势，反序列UB曲线呈下降趋势，二者相交于2002年，确定初霜日的突变点为2002年，突变前平均初霜日期为10月5日，突变后为10月16日，推迟了11 d(图5a)。终霜日正序列UF曲线呈下降趋势，反序列UB曲线呈上升趋势，UF和UB曲线相交于2000年，确定终霜日的突变点为2000年，突变后平均终初霜日期为4月24日，较突变前的5月2日提前了8 d(图5b)。无霜期正序列UF曲线呈上升趋势，反序列UB曲线呈下降趋势，UF和UB曲线相交于2001年，确定终霜日的突变点为2001年，突变后无霜期平均为173 d，较突变前的156 d延长了17 d(图5c)。

2.5 霜冻的周期变化特征

1960—2020年黄河流域初霜日、终霜日和无霜期的Morlet小波分析结果(图6~8)。初霜日存在

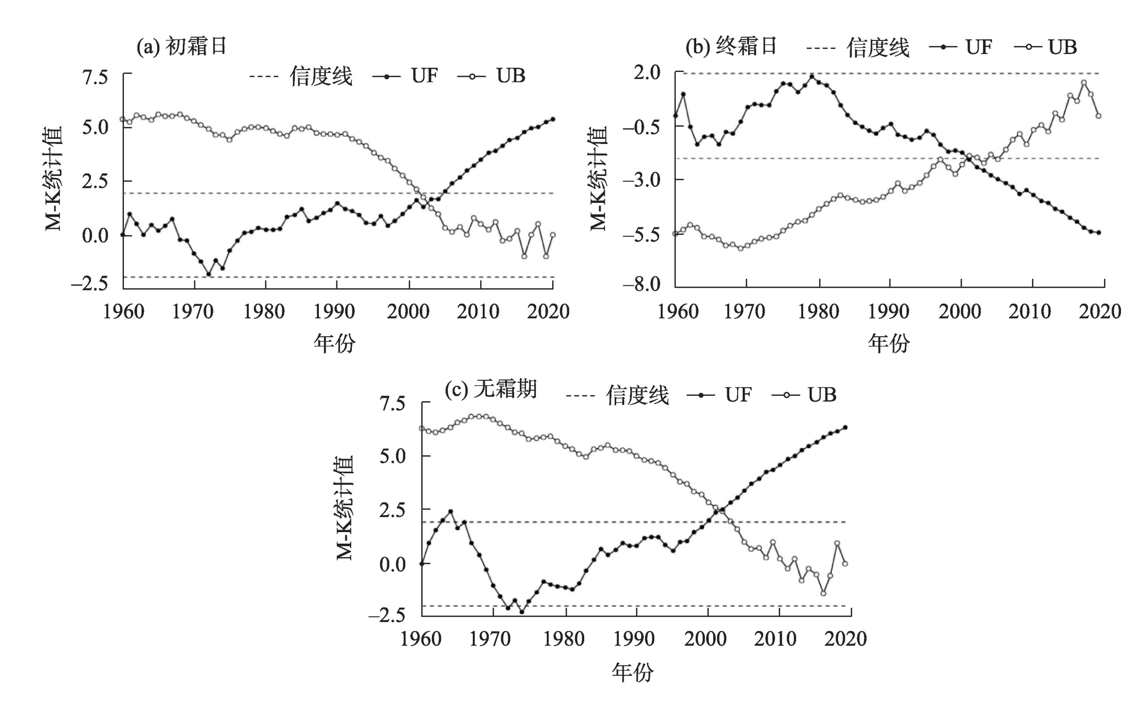


图5 1960—2020年黄河流域初霜日、终霜日和无霜期的M-K检验

Fig. 5 M-K test curves of the first, last frost dates and the frost-free period in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

11 a和28 a左右的周期变化,其中28 a的周期具有全域性,11 a左右的周期在1990年之前较为突出(图6)。初霜日的小波方差图(图6b)显示初霜日在28 a左右出现极值,为第一主周期,表明黄河流域初霜日在28 a左右会经历一个逐渐推迟变化过程。

近61 a来黄河流域终霜日存在28 a左右的周期变化(图7),且具有全域性,从终霜日的小波方差图可以看出,终霜日小波方差在28 a左右出现峰值,为其主周期,表明黄河流域终霜日在28 a左右会经历一个逐渐提前的变化过程(图7b)。

近61 a来黄河流域无霜期存在28 a左右的周期变化,且具有全域性(图8)。从无霜期的小波方差

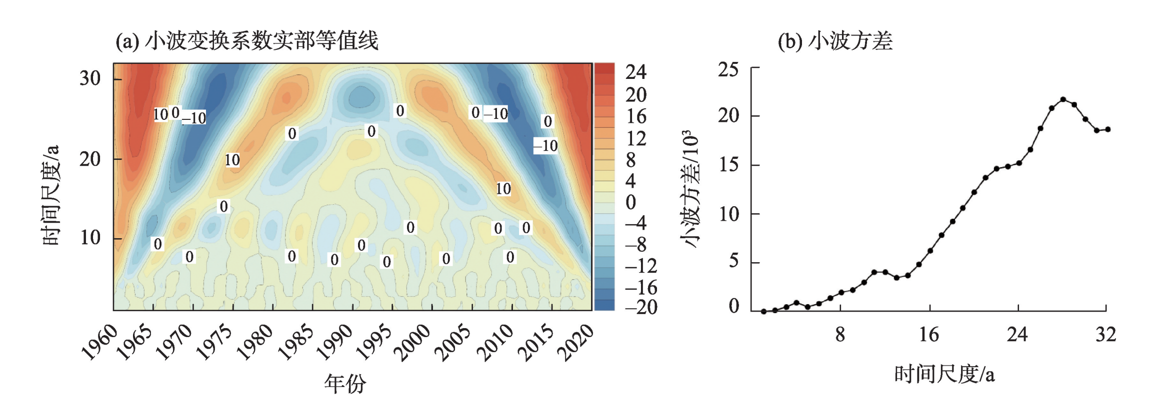


图6 1960—2020年黄河流域初霜日周期变化特征

Fig. 6 Periodic variation characteristics of the first frost date in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

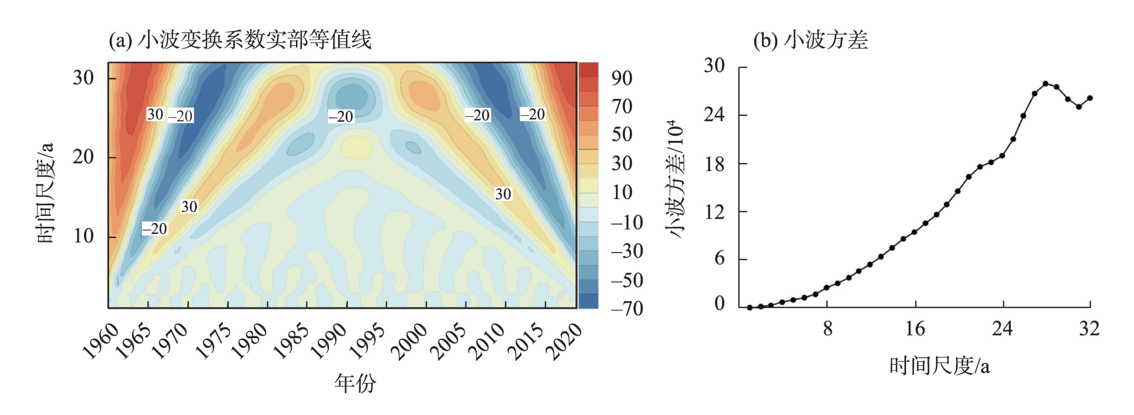


图7 1960—2020年黄河流域终霜日周期变化特征

Fig. 7 Periodic variation characteristics of the last frost date in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

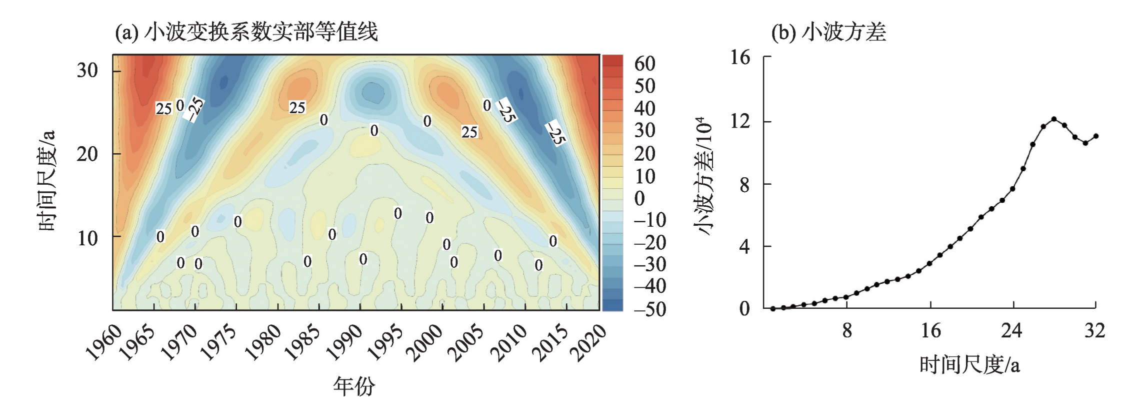


图8 1960—2020年黄河流域无霜期周期变化特征

Fig. 8 Periodic variation characteristics of the frost-free period in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

图可以看出，无霜期在28 a左右方差出现最大峰值，为第一主周期，表明黄河流域无霜期日数在28 a左右会经历逐渐延长的变化过程(图8b)。

2.6 霜冻的影响因素

黄河流域初霜日、终霜日和无霜期与地理因子及日平均气温的相关关系和回归系数如表3所示。初霜日与海拔高度的r为-0.892，表现为极强负相关关系，通过回归系数可以看出，随着海拔高度的上升，初霜日渐趋提前，每升高10 m，提前0.20 d，初霜日与经度和日平均气温分别呈强和极强正相关关系，经度和日平均气温越高，初霜日出现时间就越晚。终霜日与海拔高度呈极强正相关关系，与纬度呈弱正相关关系，海拔高度每上升10 m，纬度每增加1°，终霜日分别推迟0.17 d和3.24 d，终霜日与经度和日平均气温分别呈强和极强负相关关系，经度每增加1°，日平均气温每增加1℃，终霜日分别提前2.66 d和4.46 d。无霜期与海拔高度呈极强负相关关系，与纬度呈弱负相关关系，海拔高度每上升10 m，纬度增加1°，无霜期日数分别缩短0.37 d和5.37 d，无霜期与经度和日平均气温分别呈强和极强正相关关系，经度每增加1°，日平均气温每增加1℃，无霜期会分别延长5.71 d和9.65 d。黄河流域初霜日和无霜期均与海拔高度呈显著极强负相关关系，与日平均气温呈显著极强正相关关系，终霜日和海拔高度呈显著极强正相关关系，与日平均气温呈显著极强负相关关系，流域初、终霜日和无霜期主要受海拔高度和日平均气温影响。

表3 黄河流域初霜日、终霜日和无霜期与海拔高度、经纬度以及日平均气温的关系

Tab. 3 Relationships of the first, last frost dates and the frost-free period with the geographical parameters and average temperature in the Yellow River Basin

因素	影响因子	初霜日	终霜日	无霜期
相关系数	海拔高度	-0.892**	0.835**	-0.882**
	经度	0.641**	-0.637**	0.653**
	纬度	-0.205	0.341**	-0.269**
	日平均气温	0.965**	-0.938**	0.968**
回归系数	海拔高度	-0.020	0.017	-0.037
	经度	2.994	-2.655	5.713
	纬度	-2.185	3.243	-5.372
	日平均气温	5.137	-4.455	9.647

注：**表示相关性在0.01水平上显著相关。

3 讨论

本研究以0 m地表最低温度作为霜冻指标，分析了黄河流域1960—2020年初、终霜日和无霜期的时空分布及影响因素。在全球变暖背景下，近61 a来黄河流域初霜日推迟，终霜日提前，无霜期显著延长，这与黄土高原[17,27]、河南省[9]、宁夏[11]和山西省[30]等地区研究结果一致。

黄河流域初、终霜日和无霜期主要受海拔高度和日平均气温的影响，这与贵州省研究结果一致[31]，这是由于黄河流域横跨我国地势三级阶梯，区域内海拔高差较大有关。

在突变特征方面，黄河流域初、终霜日和无霜期分别于2002、2000年和2001年发生突变，这与山西省[30]、淮河流域[16]和甘肃省[4]霜冻日期突变时间较为接近，与中国极端气候事件突变时间段主要集中在20世纪80年代和90年代一致[32]。近百年来，全球显著变暖，研究表明全球气候状态转变发生于20世纪80年代中后期[33]，气候状态的转变导致气候变率增大及极端气候事件增加，引致初霜日推迟，终霜日提前，无霜期延长。

近61 a来黄河流域初霜日推后、终霜日提前和无霜期延长，这将延长作物生长季，为地区农业生产提供充足的热量资源，利于作物适宜种植区域扩展，然而生长季延长又增加了作物对霜冻的暴露，作物生长对霜冻的敏感性因物种及生长环境而异。因此，在未来全球变暖背景下，各地还需因地制宜的采取调整农作物种植制度等措施，以减少霜冻危害。

4 结论

(1) 1960—2020年黄河流域初、终霜平均日期分别为10月8日和4月30日，无霜期平均为161 d，近61 a来黄河流域初霜日以2.51 d·(10a)$^{-1}$的倾向率推迟，终霜日显著提前，倾向率为-2.07 d·(10a)$^{-1}$，无霜期显著延长，倾向率为4.48 d·(10a)$^{-1}$。20世纪70年代初霜日最早，终霜日最晚，无霜期最短，21世纪10年代初霜日最晚，终霜日最早，无霜期最长。

(2) 近61 a黄河流域初霜日由南到北、由东向西逐渐提前，出现在8月上旬至11月上旬，上游地区初霜日最早，下游地区出现最晚。终霜日自南向

北、由东向西逐渐推迟,出现在3月下旬至5月下旬,下游地区最早,上游地区最晚。无霜期自南向北、由东向西逐渐缩短,下游地区最长为207 d,上游地区最短为132 d。初霜日在流域各地均呈推迟趋势,终霜日仅在西南部合作和久治呈推迟趋势,无霜期在各地均呈延长趋势,下游地区初霜日和无霜期变化幅度最大。

(3) M-K突变分析表明,近61 a来黄河流域初霜日突变点为2002年,突变后初霜日推迟11 d,终霜日于2000年发生突变,突变后终霜日提前8 d,无霜期于2001年发生突变,突变后无霜期延长17 d。小波分析表明,黄河流域初、终霜日和无霜期均存在28 a左右的主周期变化。

(4) 黄河流域初、终霜日和无霜期与海拔高度和日平均气温均呈显著极强相关关系,初、终霜日和无霜期主要受海拔高度和日平均气温的影响。

参考文献(References)

[1] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis[R]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021.

[2] Richard R H. An overview of weather and climate extremes: Products and trends[J]. Weather and Climate Extremes, 2015, 10(PB): 1-9.

[3] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11. [Guo Jianping. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(1): 1-11.]

[4] 马尚谦, 张勃, 刘莉莉, 等. 甘肃省霜冻日期时空变化特征及影响因素[J]. 高原气象, 2019, 38(2): 397-409. [Ma Shangqian, Zhang Bo, Liu Lili, et al. Analysis of the characteristics of temporal and spatial changes and influencing factors of frost season in Gansu Province[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(2): 397-409.]

[5] 许艳, 王国复, 王盘兴. 近50 a中国霜期的变化特征分析[J]. 气象科学, 2009, 29(4): 427-433. [Xu Yan, Wang Guofu, Wang Panxing. Climatic change of frost in China in recent 50 a[J]. Scienta Metorologica Scienc, 2009, 29(4): 427-433.]

[6] 白磊, 张帆, 文元桥. 基于格点资料的1961—2018年中国霜冻灾害时空变化规律[J]. 中国农业气象, 2021, 42(9): 761-774. [Bai Lei, Zhang Fan, Wen Yuanqiao. Evolution of the frost hazards based on gridded meteorological data across China in 1961—2018 [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(9): 761-774.]

[7] 李芬, 张建新, 王淑凤. 1961—2012年山西终霜冻的区域特征研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(4): 656-666. [Li Fen, Zhang Jianxin, Wang Shufeng. Regional characteristics of last frost over Shanxi Province from 1961 to 2012[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(4): 656-666.]

[8] Meehl G A, Tebaldi C, Nychka D. Changes in frost days in simulations of twentyfirst century climate[J]. Climate Dynamics, 2004, 23 (5): 495-511.

[9] 姬兴杰, 李凤秀, 王纪军. 1971—2010年河南省霜期的时空分布特征及其对气温的响应[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(1): 67-75. [Ji Xingjie, Li Fengxiu, Wang Jijun. Spatial-temporal distribution of frost day and its response to air temperature changes from 1971 to 2010 in Henan Province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(1): 67-75.]

[10] 邢海虹. 历史时期陕西霜冷灾害时空分布特征研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2014, 44(5): 829-832. [Xing Haihong. The spatial and temporal regulation of the frost and cold disaster in historical period in Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2014, 44(5): 829-832.]

[11] 黄莹, 杨建玲, 李欣, 等. 基于地温的宁夏初霜冻日期气候演变及环流异常成因[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 359-369. [Huang Ying, Yang Jianling, Li Xin, et al. Climate change characteristics and circulation anomaly causes of the first frost date in Ningxia based on ground temperature[J]. Arid Land Geography, 2022, 45 (2): 359-369.]

[12] Crimp S, Bakar K S, Kokic P, et al. Bayesian space-time model to analysis frost risk for agriculture in southeast Australia[J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(8): 2092-2108.

[13] Heino R, Brúzdil R, Frland E, et al. Progress in the study of climatic extremes in northern and central Europe[J]. Climatic Change, 1999, 42(1): 151-181.

[14] Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. Characteristics of daily and extreme temperature over Canada[J]. Journal of Climate, 2010, 14(9): 1959-1976.

[15] 任景全, 郭春明, 王利伟, 等. 1961—2015年吉林省霜时空分布特征以及影响因素[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(4): 119-125. [Ren Jingquan, Guo Chunming, Wang Liwei, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and impact factors of the frost over Jilin Province from 1961 to 2015[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(4): 119-125.]

[16] 马尚谦, 张勃, 唐敏, 等. 1960—2015年淮河流域初终霜日时空变化分析[J]. 中国农业气象, 2018, 39(7): 468-478. [Ma Shangqian, Zhang Bo, Tang Min, et al. Analysis on the temporal and spatial changes of frost date in the Huaihe River Basin from 1960 to 2015[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(7): 468-478.]

[17] 郭俊文, 单红涨, 郭俊瑞, 等. 陇中黄土高原半干旱区霜冻时空分异特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 101-105. [Guo Junwen, Shan Hongtao, Guo Junrui, et al. Characteristics of spatiotemporal distribution and variation of frost in semiarid regions of the Loess Plateau in central Gansu[J]. Reasearch of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 101-105.]

[18] 程瑛, 吴晶, 李红, 等. 1961—2017年甘肃省霜冻演变特征及其

对农业的影响[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 37-46. [Cheng Ying, Wu Jing, Li Hong, et al. The variation characteristics of frost in Gansu Province from 1961 to 2017 and its impact on agriculture [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(6): 37-46.]

[19] 宁晓菊, 张丽君, 杨群涛, 等. 1951年以来中国无霜期的变化趋势[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1811-1822. [Ning Xiaoju, Zhang Lijun, Yang Quntao, et al. Trends in the frost-free period in China from 1951 to 2012[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(11): 1811-1822.]

[20] 王国复, 许艳, 朱燕君, 等. 近50年我国霜期的时空分布及变化趋势分析[J]. 气象, 2009, 35(7): 61-67. [Wang Guofu, Xu Yan, Zhu Yanjun, et al. The spatial and temporal characteristics and trend of frost days over China for the past 50 years[J]. Meteorological Monthly, 2009, 35(7): 61-67.]

[21] 马彬, 张勃, 贾艳青, 等. 1961—2014年中国内陆农业区异常初、终霜日时空变化及其与环流因子的关系[J]. 气象学报, 2017, 75(4): 661-671. [Ma Bin, Zhang Bo, Jia Yanqing, et al. Temporal and spatial variations of the first and last frost dates in China's inland agricultural region from 1961 to 2014 and their relationships with circulation factors[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(4): 661-671.]

[22] 陈少勇, 郑延祥, 楼望萍, 等. 中国西北地区初霜冻的气候变化特征[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 165-172. [Chen Shaoyong, Zheng Yanxiang, Lou Wangping, et al. Changes in the first frost date from 1961 to 2009 in northwest China[J]. Resources Science, 2013, 35(1): 165-172.]

[23] 吴杨, 金志凤, 叶建刚, 等. 浙江茶树春霜冻发生规律及其与太平洋海温的遥相关分析[J]. 中国农业气象, 2014, 35(4): 434-439. [Wu Yang, Jin Zhifeng, Ye Jiangang, et al. Teleconnection analysis between spring frost damage on tea in Zhejiang Province and sea surface temperature in Pacific[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(4): 434-439.]

[24] 贾艳青, 张勃, 张耀宗, 等. 城市化对长三角地区极端气温影响的时空分异[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5): 814-828. [Jia Yanqing, Zhang Bo, Zhang Yaozong, et al. Effect of urbanization on spatial and temporal variation of extreme temperature events in the Yangtze River Delta[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(5): 814-828.]

[25] 吕佳佳, 朱海霞, 宫丽娟, 等. 1971—2016年寒地大豆霜冻害时空演变特征及对产量影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(2): 260-268. [Lü Jiajia, Zhu Haixia, Gong Lijuan, et al. Spatial-temporal characteristics of frost damage on soybean and its effect on soybean yield from 1971 to 2016 in cold regions[J]. Soybean Science, 2020, 39 (2): 260-268.]

[26] 高文波, 林正雨, 王明田, 等. 1971—2020年西南茶区灌木型茶树晚霜冻害危险性时空演变特征[J]. 应用生态学报, 2021, 32 (11): 4029-4038. [Gao Wenbo, Lin Zhengyu, Wang Mingtian, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of the late frost damage risk to shrubby tea trees in tea region, southwest China from 1971 to 2020[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32 (11): 4029-4038.]

[27] 马琼. 1980—2014年黄土高原霜冻时空变化及冬小麦晚霜冻危险性研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016. [Ma Qiong. The temporal and spatial distribution of frost and hazard risk of winter wheat late frezzing in the Loess Plateau from 1980 to 2014[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2016.]

[28] 韩荣青, 李维京, 艾婉秀, 等. 中国北方初霜冻日期变化及其对农业的影响[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 526-532. [Han Rongqing, Li Weijing, Ai Wanxiu, et al. The climatic variability and influence of first frost dates in northern China[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 526-532.]

[29] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999. [Wei Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999.]

[30] 钱锦霞, 张霞, 张建新, 等. 近40年山西省初终霜日的变化特征[J]. 地理学报, 2010, 65(7): 802-808. [Qian Jinxia, Zhang Xia, Zhang Jianxin, et al. The changing trends of the first and last frost dates over Shanxi Province for the past 40 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(7): 802-808.]

[31] 张波, 于飞, 吴战平, 等. 贵州霜冻气候变化特征[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(4): 685-695. [Zhang Bo, Yu Fei, Wu Zhanping, et al. Climate characteristics of frost in Guizhou[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(4): 685-695.]

[32] 张大任, 郑静, 范军亮, 等. 近60年中国不同气候区极端温度事件的时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2019, 40(7): 422-434. [Zhang Daren, Zheng Jing, Fan Junliang, et al. Spatiotemporal variations of extreme temperature indices in different climatic zones of China over the past 60 years[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(7): 422-434.]

[33] Reid P C, Hari R E, Beaugrand G, et al. Global impacts of the 1980s regime shift[J]. Global Change Biology, 2016, 22(2): 682-689.

Spatial and temporal characteristics and influencing factors of frost date in the Yellow River Basin from 1960 to 2020

ZHANG Zhigao[1], XU Xiaoman[2], GUO Chaofan[1], CAI Maotang[3],
YUAN Zheng[4], ZHANG Mingzhe[1]

(1. School of Resources Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455000, Henan, China; 2. Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development, Henan University, Kaifeng 475001, Henan, China; 3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, Henan, China)

Abstract: The study of the evolution characteristics of frost in the Yellow River Basin provides a basis for scientifically preventing frost hazards, promoting rational development, and use of climate resources. Based on the statistical data from 83 meteorological stations in the Yellow River Basin from 1960 to 2020, the Mann-Kendall mutation test, Morlet wavelet analysis, and correlation analysis were used to analyze the characteristics of spatial and temporal changes and influencing factors of frost date in the Yellow River Basin. The results showed that: (1) the average first frost date in the Yellow River Basin was October 8, the last frost date was April 30, and the average frost-free period was 161 days from 1960 to 2020. In the past 61 years, the first frost day was postponed at a rate of 2.51 days·$(10a)^{-1}$, the last frost day was advanced at a rate of −2.07 days·$(10a)^{-1}$, and the frost-free period was significantly prolonged at a rate of 4.48 days·$(10a)^{-1}$. In the 1970s, the first frost day was the earliest, the last frost day was the latest, and the frost-free period was the shortest. In 2010, the first frost day was the latest, the last frost day was the earliest, and the frost-free period was the longest. (2) Wavelet analysis showed that the first and last frost days and frost-free periods had a main period of about 28 a in the Yellow River Basin. The first frost day suddenly changed in 2002, the last frost day suddenly changed in 2000, and the frost-free period suddenly changed in 2001. (3) In terms of spatial distribution, from the upper to the middle and lower reaches, the first, the last frost dates and the frost-free period were gradually delayed, advanced, and extended, respectively. The first frost day was delayed in all parts of the basin, the last frost day was delayed only in Hezuo and Jiuzhi stations in the southwest, and the frost-free period was prolonged in all parts of the basin, the variation range of the first frost date and frost-free period in the lower reaches was the largest. (4) The first and last frost days and frost-free periods in the Yellow River Basin were mainly affected by altitude and the average temperature.

Key words: first frost date; last frost date; frost-free period; spatial-temporal variations; Yellow River Basin